

REVISTA BRASILEIRA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

PROTÓTIPO DE UM REATOR DE BIODIESEL SUSTENTÁVEL ALIMENTADO ENERGETICAMENTE POR ENERGIA SOLAR¹

FABIANO ALMEIDA NASCIMENTO², LUIZ ANTONIO PIMENTEL CAVALCANTI²

¹Aceito para Publicação no 2º Trimestre de 2017.

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA).
fabianoalmeidaeng@gmail.com, luiz.cavalcanti@ifba.edu.br.

RESUMO

O estudo de vias para implementação e utilização de fontes de energia alternativas tem aumentado exponencialmente nas últimas décadas, haja vista a redução das reservas de petróleo e o prejuízo ambiental relacionado ao uso de combustíveis fósseis. Neste contexto, o biodiesel apresenta-se como potencial substituto para o diesel, porém, a não competitividade em termos econômicos, ainda é um empecilho para uma maior utilização do combustível. Alternativas de redução de custos operacionais do processo de produção do biodiesel, realizado mais comumente por meio de transesterificação metílica, se apoiam na utilização da energia solar para geração de eletricidade e obtenção de calor para a reação química. Neste sentido, o presente trabalho apresenta o processo de *design*, dimensionamento e construção de um reator de biodiesel sustentável alimentado energeticamente por um coletor solar construído com materiais reciclados, tais como garrafas de polietileno tereftalato (PET) e embalagens do tipo Tetra Pak, e energizado eletricamente por um sistema fotovoltaico. O estudo solarimétrico e fotovoltaico foi feito levando em consideração a previsão do consumo das cargas elétricas. Ao término da construção do protótipo, foram realizados testes para verificar a necessária transferência de calor para a reação e o funcionamento do circuito elétrico visando atestar a confiabilidade. O produto final avaliado com auxílio da técnica de cromatografia gasosa mostrou que o biodiesel apresentou rendimento em termos do teor de

éster de 97,6%, resultado superior ao recomendado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) em sua Resolução N° 45/2014 que é de 96,5%.

Palavras Chave: Biodiesel, Energia Fotovoltaica, Sustentabilidade, Coletor Solar.

PROTOTYPE OF A SUSTAINABLE BIODIESEL REACTOR POWERED ENERGETICALLY BY SOLAR ENERGY.

ABSTRACT

The study of routes aiming the implementation and use of energy sources has increased exponentially during the last decades, due to reduction of petroleum reserves and the environmental damage related to fossil fuels use. In this context, biodiesel appears as a potential substitute for diesel, however, because it is not economically competitive, there is still an obstacle to greater use of the sustainable fuel. Alternatives for operational costs reduction of biodiesel production process, carried out commonly by transesterification, are based on solar energy on generating electricity and obtaining heat for the main chemical reaction. In this way, this work presents the processes of designing, dimensioning and constructing of a sustainable biodiesel reactor powered by a solar collector, made of materials potentially recyclable as PET bottles and Tetra Pak packages, and electric energized by a photovoltaic system. The solar radiation and photovoltaic study was based on the forecast of the loads electric consumption. After the prototype construction was done, heating tests were carried out to verify the heat transfer to the chemical reaction, and the electrical circuit was verified aiming to claim the reliability of the electrical equipment to be used. The final product was evaluated with the aid of gas chromatography technique showing that the biodiesel produced presented 97.6% in ester contents, bigger value than the recommended by the National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP) in its Resolution No. 45 / 2014 which standard value is 96.5%.

Keywords: Biodiesel, Photovoltaic Energy, Solar collector.

INTRODUÇÃO

Uma parcela da energia consumida é demandada pela população e indústria no mundo utiliza como fonte primaria principal o petróleo, gás natural e carvão mineral. O uso intensivo de tais fontes está associado aos impactos ambientais, econômicos e sociais, havendo, portanto, um grande fomento da comunidade científica em buscar meios de produção e utilização de biocombustíveis e outras fontes de energia a fim de incrementar a matriz energética com a utilização de fontes renováveis minimizando os danos ambientais já causados (KEMERICH *et al.*, 2016).

Dentro desse contexto, o biodiesel aparece como um potencial substituto aos derivados de petróleo por apresentar característica renovável, biodegradável e atóxico, qual é capaz de emitir quantidades quase irrelevantes de compostos com enxofre em sua combustão. Programas de incentivo a produção e uso de biocombustíveis foram implantados em diversos países nas últimas décadas, aumentando assim a necessidade de melhoramento e crescimento dos seus processos produtivos para que possam se tornar não só ambientalmente sustentáveis, mas também economicamente viáveis (RAMOS *et al.*, 2011).

O biodiesel pode ser obtido por meio de três rotas distintas, sendo elas: o craqueamento, esterificação e transesterificação. No Brasil esse biocombustível é usualmente obtido por meio da transesterificação alcalina homogênea, qual exige óleo com refinamento grau alimentício, fazendo com que se elevem os custos do produto final diminuindo sua competitividade em relação ao diesel de origem fóssil. Nesse sentido, para que haja a diminuição dos custos de produção faz-se necessário recorrer à utilização de biomassa não refinada (óleos e gorduras residuais - OGRs) e uso de energia alternativa para suprir as demandas energéticas (ELICKER *et al.*, 2015).

A transesterificação, por sua vez, apresenta ganho de rendimento quando da agitação dos reagentes durante a reação e o devido aquecimento, numa faixa de temperatura entre 40°C e 50°C, do sistema. Tais estratégias para o aumento da eficiência trazem consigo o aumento do custo do processo global e, por consequência, do produto final visto que ambos os processos, de aquecimento e agitação, necessitam da energia para sua ocorrência (CAVALCANTI, 2016).

Sendo o sol a maior fonte de energia primaria disponível no planeta, a procura por meios mais eficientes e baratos de utilização e conversão da energia entregue pelos raios solares é crescente e o barateamento das tecnologias aplicáveis a estes fins popularizam a sua

utilização na busca pela diminuição dos custos e aumento do ganho ambiental na geração de energia elétrica e térmica (SHUCK, 2012).

Cavalcanti (2016) apresentou uma proposta alternativa ao uso de resistências elétricas para aquecimento da reação de transesterificação ao propor a utilização de coletores solares para suprir a demanda energética calorífica para tal processo aliada a diminuição do custo operacional. A proposta mostrou-se viável ao ponto que a temperatura da reação atingiu os valores desejáveis e a produção de biodiesel se deu com uma porcentagem de 97,1% de teor de ésteres metílicos de ácidos graxos (EMAG), valor superior ao 96,5% indicado pela Resolução ANP 45/2014 (ANP, 2014) resolução vigente brasileira.

O presente trabalho teve como objetivo projetar, construir e avaliar a eficiência e eficácia de um reator para produção de biodiesel composto por um sistema de aquecimento que, a partir de um coletor solar sustentável e de um sistema de geração de energia fotovoltaica, objetiva atender todas as demandas energéticas do processo de transesterificação alcalina homogênea através de fontes renováveis de energia e a replicação em maior escala dos resultados obtidos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os componentes e equipamentos necessários para construção de todo o sistema de produção de biodiesel foram avaliados, planejando-se quais os materiais seriam necessários para construção dos módulos do sistema visando à diminuição do custo global do processo de produção do biodiesel. Determinou-se, portanto, os seguintes subsistemas:

1. Aquecimento;
2. Agitação;
3. Sistema de potência de energia elétrica;
4. Bombeamento;
5. Controle de velocidade do agitador;

Materiais utilizados

Na Tabela 1, são expostos os materiais utilizados na construção de todo o sistema do protótipo e a situação de obtenção dos mesmos.

Tabela 1: Materiais utilizados para produção do sistema sustentável de produção de biodiesel.

Fonte: Autor.

Material	Quantidade	Situação
Garrafas PET 2 Litros	06 unidades	Reutilizado
Tubulação PVC ½ polegada	05 metros	Novo
Caixas de Leite <i>Tetra Pak</i>	06 unidades	Reutilizado
Mangueira transparente	02 metros	Novo
Bomba CA 127V 0,75W	01 unidade	Reutilizado
Motor elétrico CA 127V 40W	01 unidade	Reutilizado
Balde 20 Litros	01 unidade	Reutilizado
Conexões Joelho para tubulação PVC	06 unidades	Novo
Conexões “T” para tubulação PVC	06 unidades	Novo
Baterias Estacionárias 45Ah	02 unidades	Reutilizada
Painel Solar Fotovoltaico 50Wp 14,4V	01 unidade	Novo
Controlador de Carga 12V 10A	01 unidade	Novo
Inversor de Frequência CC/CA 400W 12V/127V	01 unidade	Novo
Cabeamento elétrico 6 mm	10 metros	Reutilizado

Coletor solar

A reação de transesterificação alcalina homogênea geralmente necessita de circulação de água aquecida em um reator encamisado. Buscando a viabilidade técnica, ganho econômico e diante da disponibilidade de determinados materiais decidiu-se que o sistema de

aquecimento se daria através de um coletor solar sustentável baseado no Manual de Construção e Instalação de Aquecedor Solar Composto de Produtos Descartáveis da Celesc (ALANO, 2009), constituído basicamente de garrafas PET, caixas de leite Tetra Pak e canos de PVC, pintados em preto fosco, sendo o dimensionamento do sistema de aquecimento feito a partir da previsão da quantidade nominal de produção de biodiesel do protótipo.

Depois de finalizada a construção do protótipo, a variação de temperatura do projetado volume de água, a ser aquecida pelo coletor solar para aquecimento da reação, foi mensurado em intervalos de 15 minutos enquanto o sistema era exposto ao sol, sendo estes dados analisados observando o alcance da temperatura ideal para reação a fim de determinar se a quantidade de calor absorvido pelo coletor seria suficiente para atender as demandas energéticas do processo.

Sistema de alimentação com placa fotovoltaica

O estudo solarimétrico e fotovoltaico foi baseado nas informações contidas no Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos do Centro de Referência energia solar e eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB) e do Centro Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL) (PINHO; GALDINO, 2014). , levando em consideração a previsão do consumo das cargas elétricas. Os valores de potência elétrica dos equipamentos a serem utilizados foram levantados e uma projeção do consumo em Wh feita para todo o processo de produção do biodiesel, sendo este valor, por consequência, a potência mínima do sistema fotovoltaico. A quantidade de baterias (considerando 12 horas de autonomia) utilizadas foi definida considerando a potência de consumo (40,75W) e o tempo de uma batelada de produção de biodiesel (1 hora por batelada / 18 bateladas dia). A Figura 1 apresenta o esquema de montagem elétrica do protótipo.

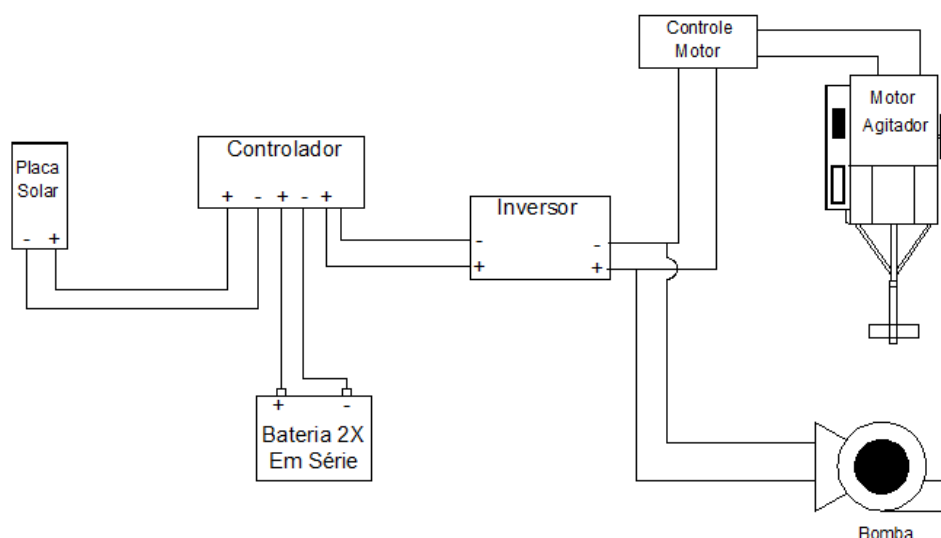


Figura 3 – Esquemática do circuito elétrico utilizado no protótipo

(Fonte: Autoria própria)

Reator sustentável

O reator dotado de sistema de agitação, mostrado na Figura 2, foi concebido a partir do dimensionamento baseado em textos de operações unitárias na literatura especializada (FOUST, 1982) e foi montado a partir de materiais residuais da construção civil além de um motor de ventilador, um rolamento e um recipiente de vidro. O sistema de potência de energia elétrica foi feito com base em um sistema fotovoltaico em um sistema isolado e o sistema de bombeamento montado com uma bomba reutilizada de máquina de lavar. O controle de velocidade do agitador foi concebido a partir de um circuito de variação de tensão AC basicamente composto por um DIAC e um TRIAC, conforme Figura 3.

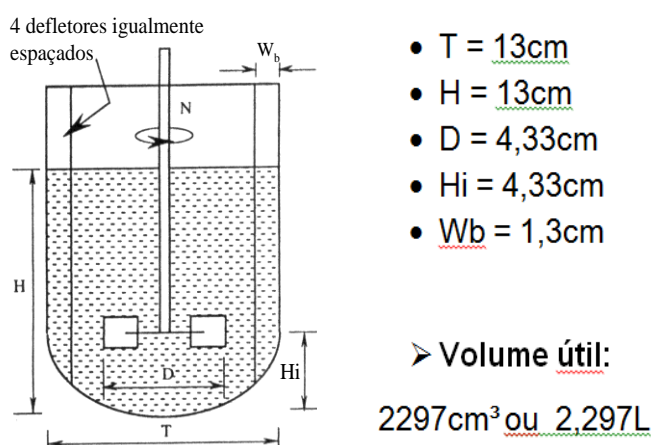


Figura 2 – Dimensões do reator construído (Fonte: Autoria própria)

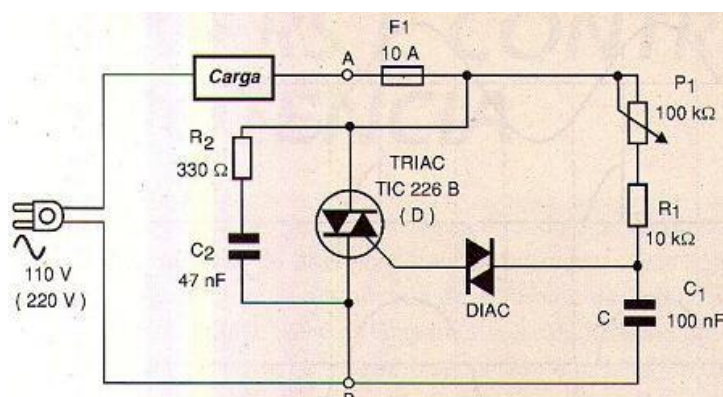


Figura 3 – Circuito utilizado para controle de velocidade do agitador

(Fonte: BRAGA, 2016)

Produção de biodiesel

O B100 derivado de óleo de soja, 2,2 L, foi produzido através da reação de transesterificação alcalina homogênea (catalisador: metóxido de potássio, 1% w/w, com relação à massa de óleo). O reator químico foi o um recipiente de vidro conforme descrito anteriormente imerso em um barrilete de 20 L adaptado para funcionar como um reator encamisado do qual circulava a água proveniente do coletor solar. Foi realizada a aferição da temperatura de reação por meio de um termômetro de digital imerso no reator onde estava ocorrendo a reação de transesterificação, e a agitação mecânica foi obtida com o auxílio de um impelidor do tipo pás projetado conforme mostrado na Figura 2. As condições operacionais dessas etapas foram: a) temperatura de 50° C; b) pressão de 1 atm; c) rotação do agitador mecânico de 300 rpm; d) razão molar álcool/óleo de 6:1; e e) tempo reacional de 1h.

Ao final da reação, procedeu-se a separação da glicerina da mistura reacional com o auxílio de um funil de decantação. A fase mais leve da mistura – contendo B100, catalisador e excesso de metanol – passou pela etapa de purificação, que constou de lavagem ácida com solução de ácido clorídrico 0,5M, e as demais lavagens foram realizadas com água destilada, visando o ajuste do pH do biodiesel produzido. A secagem do biodiesel foi realizada em evaporador rotativo com vidraria vertical da marca IKA, modelo RV10. Uma análise econômica e de confiabilidade do sistema foi feita com os parâmetros disponíveis visando observar os ganhos econômicos da produção de biodiesel com o protótipo quando comparado a outros sistemas.

Análise composição química do biodiesel

A composição química do biodiesel produzido foi analisada por cromatografia gasosa, com cromatógrafo de marca Ciola Gregory, modelo CG Máster, coluna Carbowax (dimensão de 30,0 m de comprimento, $5,3 \times 10^{-4}$ m de diâmetro interno e espessura da fase estacionária de $1,0 \times 10^{-9}$ m). Usou-se o hidrogênio (White Martins $\geq 99,99\%$) como eluente. Os padrões do EMAG foram adquiridos a Sigma-Aldrich. Determinou-se também por cromatografia gasosa a composição de teor de ésteres no biodiesel produzido.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A determinação do posicionamento ideal em relação ao sol para o coletor solar e o painel fotovoltaico foi feita conforme descrito no Manual de Construção e Instalação de Aquecedor Solar Composto de Produtos Descartáveis da CELESC. Na cidade de Paulo Afonso - BA, local de realização dos testes no protótipo, se localiza geograficamente nas coordenadas $09^{\circ} 24' 22''$ S e $38^{\circ} 12' 53''$ W. Esta localização geográfica é fundamental para a determinação da inclinação do painel solar que deve ser igual, em graus, à latitude do local de aplicação do protótipo (Cerca de 10° nesse caso). Ainda segundo o Manual supracitado, a inclinação da placa solar fotovoltaica se dá para o norte, tendo em vista o movimento relativo do sol e a inclinação da terra em relação ao seu próprio eixo.

O dimensionamento das baterias utilizadas no sistema fotovoltaico isolado e da própria placa solar fotovoltaica se deu a partir do levantamento do tempo da reação de produção do biodiesel – uma hora por batelada e autonomia desejada de 12 horas – além da potência dos equipamentos elétricos utilizados no protótipo: bomba e o motor do agitador

40,75W. O controlador de carga deverá atender a uma corrente máxima de operação de 3,5A e uma tensão de operação de 12V, considerando a geração elétrica do painel fotovoltaico e a potência total do sistema, e o inversor CC/CA deverá atender a potência máxima de 40,75W. Considerando a corrente de funcionamento máxima e a autonomia desejada, duas baterias de 45Ah são suficientes para o sistema. A estrutura física do protótipo montado é mostrada na Figura 4.



Figura 4 – Protótipo montado para realização de testes

(Fonte: Autoria própria)

O coletor solar foi instalado no pátio do prédio do curso de biocombustíveis do Instituto de Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), localizado na cidade de Paulo Afonso-BA. Os valores de temperatura no coletor solar foram avaliados no período da manhã por apresentar o período crítico de funcionamento do sistema, tendo em vista a menor incidência/potência solar e a menor temperatura da água visto o resfriamento durante a noite. A captação de calor suficiente para reação será garantida no período vespertino visto o maior tempo de exposição ao sol e maior potência solar. O estudo indicou que a partir das 9 horas da manhã, em local com insolação, a temperatura aferida no termômetro foi de 40°C, havendo picos de temperatura no coletor por volta das 12 horas com temperaturas médias de

48°C. Segundo Cavalcanti (2016) a produção de biodiesel metílico pode ser realizada na faixa de temperatura entre 30 e 50°C. Após estudos sobre a energia solar e a partir da realização de testes no protótipo do coletor solar sustentável, percebeu-se que o funcionamento do sistema apresenta um ganho rápido de energia, principalmente nos períodos com mais radiação solar, com um considerável aumento da temperatura nos primeiros 30 minutos. Foi possível notar que o uso dessa tecnologia para o aquecimento da reação de transesterificação teria êxito, devido essa reação acontecer com uma temperatura mínima girando em torno dos 30°C.

A reação de transesterificação foi conduzida quando o coletor apresentou a temperatura de 51°C. No presente trabalho a atenção foi voltada principalmente no teor de éster, uma vez que o objetivo era construir um coletor capaz de realizar a reação de transesterificação satisfatoriamente. Logo, os demais parâmetros citados na Resolução ANP n°45 (ANP, 2014) não foram relevantes para o esta pesquisa. A Figura 5 mostra o protótipo em um esquema elétrico e funcional posicionado conforme aplicação real e a Figura 6 mostra o processo de separação entre o biodiesel e glicerina que caracteriza o início do processo de purificação do biocombustível.

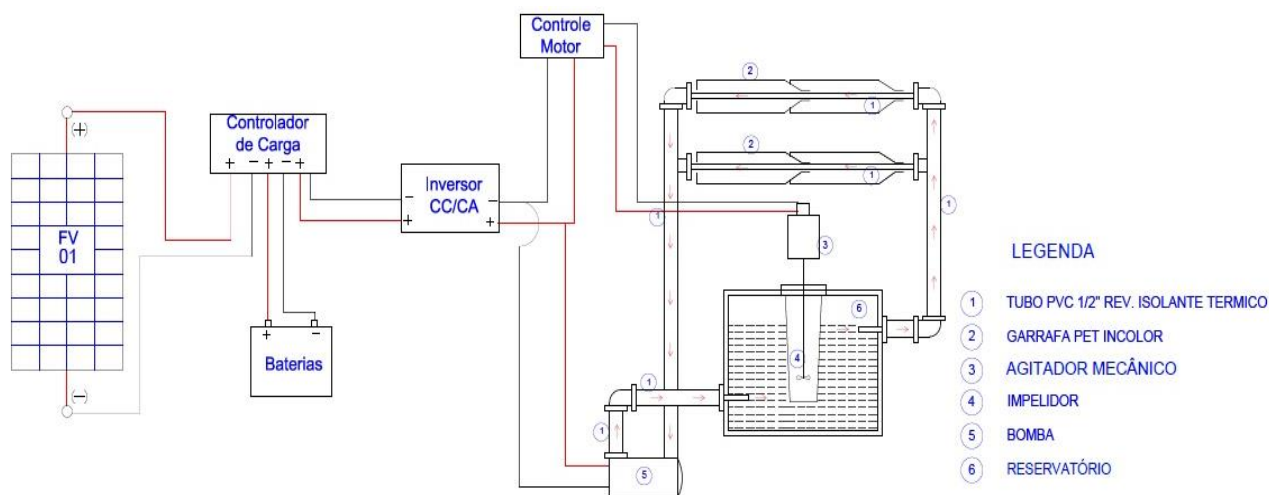


Figura 5 – Esquema do sistema conforme aplicação real (Fonte: Autoria própria)



Figura 6 – Biodiesel produzido a partir do protótipo do reator (Fonte: Autoria própria)

A primeira batelada de produção do biodiesel foi produzida seguindo a metodologia apresentada na seção materiais e métodos e o produto final avaliado com auxílio da técnica de cromatografia gasosa mostrou que o biodiesel apresentou rendimento em termos do teor de éster de 97,6%, resultado superior ao recomendado pela ANP em sua Resolução N° 45/2014 que é de 96,5%. Apenas o teor de éster foi avaliado, pois o referido parâmetro é considerado determinante para confirmar se produto final pode ser ou não chamado de biodiesel, em outras palavras segundo a referida Resolução teores de éster inferiores a 96,5% não podem ser considerado como biodiesel.

A Tabela 2 mostra o teor de ésteres metílicos de ácidos graxos (EMAG) presentes no biodiesel. Ao avaliar os resultados do perfil cromatográfico do biodiesel de soja com relação aos teores de ácidos graxos, verificou-se que 29,74% dos ácidos graxos são saturados e 70,26% dos ácidos graxos são insaturados. Tais valores estão de acordo com aqueles publicados por Knothe *et al.* (2006). O teor de EMAG para o biodiesel mostrou que o baixo percentual de saturados confere ao biodiesel de soja baixo ponto de névoa e de fluidez, podendo este combustível ser utilizado em locais com climas frios.

O perfil cromatográfico mostra ainda que 70,26% dos EMAG são insaturados. As duplas ligações presentes nos ésteres metílicos de ácidos graxos – C18:1 e C18:2 – estão mais susceptíveis a oxidação devido ao oxigênio e à umidade presentes no ar, à incidência de luz, entre outros fatores que afetam diretamente a estabilidade oxidativa desse biodiesel. Desse modo, o B100 produzido com a matéria-prima soja não pode ser armazenado por longos períodos de tempo, pois isso afetará diretamente sua viabilidade comercial, em razão da perda de suas propriedades de combustão.

Os valores apresentados na Tabela 2 são considerados satisfatórios com relação ao B100-S, visto que tais valores são próximos àqueles encontrados por Cavalcanti (2016). Com

relação ao teor de éster, o B100-S produzido apresentou um valor de 97,6%. A Resolução ANP n° 45/2014 (Brasil, 2014) especifica um teor de éster mínimo no biodiesel de 96,5%, ou seja, pode-se afirmar que o resultado da produção do biodiesel com relação ao teor de éster foi satisfatório, visto que obtivemos um resultado dentro dos padrões estabelecidos pela ANP para o teor de éster.

Tabela 2 – Composição em termos dos ésteres metílicos de ácidos graxos presente no biodiesel (Fonte: Autoria própria)

B100-S					
EMAG	Saturado		Insaturado		
	C16:0	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3
Teor (%)	22,43	7,31	15,98	51,07	3,21

O protótipo atesta que a produção do biodiesel pode ser alimentada termicamente com um sistema sustentável e de baixo custo, utilizando a energia solar para aquecimento do sistema com níveis de calor suficientes para o funcionamento com bom rendimento da reação de transesterificação.

CONCLUSÃO

A finalização do protótipo e a posterior produção de biodiesel com o mesmo mostrou que foi possível suprir a demanda energética de calor para reação de transesterificação com um coletor sustentável construído a partir de materiais reciclados e de baixo custo. Os materiais reciclados se comportaram de maneira satisfatória durante todos os testes.

O sistema fotovoltaico dimensionado e utilizado durante o experimento foi suficiente para suprir a demanda elétrica do sistema durante uma batelada e o circuito elétrico projetado foi montado e apresentou alta confiabilidade durante o processo de produção do biodiesel.

O biodiesel produzido apresentou rendimento satisfatório em termos do teor de éster que foi de 97,6% para a produção no primeiro teste.

A sistemática sustentável de produção do biodiesel se mostrou de alta confiabilidade e não apresentou empecilhos claros que pudessem impedir a replicação do sistema numa escala maior apresentando menor custo de implantação e manutenção.

REFERÊNCIAS

ALANO, J. A. (org.). Manual do Aquecedor Solar – Aquecedor solar composto de produtos descartáveis: Manual de construção e instalação. Santa Catarina: Celesc Distribuição S.A, 2009.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Resolução nº 45, de 25 de agosto de 2014. Disponível em: <http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2014/agosto/ranp_45_-_2014.xml>. Acesso em: 01 mar. 2017.

BRAGA, N. C. Dimmers e controles de potência (ART071). 2014. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/619-dimmers-e-controles-de-potencia-art071>>. Acesso em: 10 set. 2016

CAVALCANTI, L. A. P. Produção de Biodiesel Metílico de Soja com o Auxílio de um Coletor Solar Sustentável. Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB, [S.l.], n. 29, p. 105-109, jun.

2016. ISSN 2447-9187. Disponível em: <<http://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/356>>. Acesso em: 24 Jul. 2016. doi:<http://dx.doi.org/10.18265/1517-03062015v1n29p105-109>.

ELICKER, C., *et al.* Estudo Da Utilização Da Biomassa De Cianobactérias Como Matéria-Prima Para A Síntese De Biodiesel Através Da Reação De Esterificação In Situ. Revista Virtual de Química, v. 7, n. 6, p. 2497-2508, 2015. Disponível em: <<http://www.uff.br/RVQ/index.php/rvq/article/view/1251/672>>. Acesso em: 19 nov. 2015.

FOUST, A. Princípios das Operações Unitárias, 2ª ed. Editora LTC, 1982.

KEMERICH, P. D. C., *et al.* Paradigmas Da Energia Solar No Brasil E No Mundo. Revista Eletrônica Em Gestão, Educação E Tecnologia Ambiental, V.20, p. 241-247, jan-abr. 2016. ISSN 2236-1170.

KNOTHE, G.; GERPEN, J. V.; KRAHL, J.; RAMOS, L. P. Manual de Biodiesel. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. (org.). Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CRESESB-CEPEL, 2014.

RAMOS, L. P. *et al.* Tecnologias de Produção de Biodiesel. Revista Virtual de Química, Vol.3, No.15, p. 385-405, nov. 2011. ISSN 1984-6835.

SCHUCK, M. L. R. Coletor Solar Para Pré-Aquecimento Do Ar Em Sistemas De Secagem, Estudo De Caso – Cura Do Tabaco. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)– Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.